干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于树轮的塔里木河下游生态输水对胡杨生长特征影响研究

周洪华， 陈亚鹏， 杨玉海， 朱成刚
（中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：采用树木年轮和稳定同位素技术，分析了2000—2015年生态输水对塔里木河下游胡杨树木轮宽指数和树轮稳定碳同位素比率（$\delta^{13}C$）的影响，探讨了生态输水与胡杨生长的关系。研究结果表明：（1）胡杨生长与生态输水量有着密切关系。受生态输水影响，塔里木河下游上段英苏断面胡杨轮宽指数和树轮$\delta^{13}C$经历了3个阶段：在最初前4 a（2000—2003年）的输水过程中，胡杨生长响应十分敏感，胡杨轮宽指数和树轮$\delta^{13}C$呈增加趋势，其平均值分别为1.52和−26.70‰；但在2004—2009年，随着生态输水量的逐渐减少，胡杨轮宽指数和树轮$\delta^{13}C$逐渐下降，分别较2000—2003年平均减少了28.83%和2.41%；当2010—2015年生态输水重新稳定后，胡杨轮宽指数和树轮$\delta^{13}C$也逐渐增加并趋于稳定。（2）输水时间与胡杨生长有着密切关系。胡杨生长与生长年（前一年9月—当年8月）、生长季（4—8月）和前一生长年（前一年4月—当年3月）生态输水相关性最高，与自然年（1—12月）生态输水相关性不显著。其中，2008年自然年（1—12月）没有下泄生态水，2009年（1—12月）虽然有输水，但因2009年生长季、生长年和前一生长年均没有生态水补给，导致胡杨轮宽指数和树轮$\delta^{13}C$在2009年降至2000—2015年的最低值，分别为0.76和−27.50‰，较2003年分别降低了61.18%和3.14%。（3）根据研究结果，推导出生态输水促进胡杨生长的作用机理：塔里木河下游的生态输水有效抬升了地下水位，改善了胡杨生长的水分环境，提升了胡杨水分利用效率，从而增加光合累积产物，最终促进了树木的生长。但生态输水对地下水埋深、胡杨生长的影响具有滞后效应，滞后时间约为1 a。为维持荒漠河岸林的有效恢复与重建，建议塔里木河下游生态输水最好在植物生长季实施。

关 键 词：生态输水；轮宽指数；稳定碳同位素；地下水埋深；胡杨
文章编号：

塔里木河下游河道断流引发的严重生态问题在中国乃至世界范围都是十分典型的，该区生态恢复与生态安全问题已引起了世界各地和社会各界的高度关注[1-2]。自2000年塔里木河下游生态输水工程实施以来，以胡杨为主体的荒漠河岸林得到了拯救和复壮，众多学者就荒漠河岸林对生态输水的生理生态响应进行了详细解读。然而，已有的研究主要聚焦在天然植被生理生态指标日变化或者年内、季节变化对生态输水的响应[3-5]，或者利用植物群落的短期（≤10 a）生态调查结果评估生态输水下的植物恢复效益[6-9]，缺乏植物长期生长过程(>10 a)对间断性生态输水响应的研究。因此，目前的研究很难从植物生长过程角度准确评估长期间断性生态输水下的植被恢复效应，也难以从维系荒漠河岸林长期生长角度提出适宜的生态输水方案，而这正是生态输水工程管理的关键难题。

胡杨是塔里木河下游荒漠河岸林的关键乔木，其在生长发育过程中见证着下游的生态环境变迁，是记录生态环境变化的绝佳“档案”，能直接反应区域生态环境恢复过程[1-2,10]。本文采用树木年轮和稳

收稿日期：2021-02-03； **修订日期：**2021-03-31
基金项目：国家自然科学基金（U1803101，U1703101）；科技部科技基础资源调查专项（2019FY100203）
作者简介：周洪华（1979-），女，副研究员，主要从事干旱区生态水文过程研究. E-mail: zhouhh@ms.xjb.ac.cn
通讯作者：朱成刚（1976-），男，副研究员，主要从事干旱区生态恢复研究. E-mail: zhuchg@ms.xjb.ac.cn

定同位素技术,分析塔里木河下游生态输水工程下胡杨的生长特征变化,解析生态输水工程与胡杨长期生长过程的关系,并试图探讨生态输水促进胡杨生长的机理,为塔里木河下游荒漠河岸林恢复与重建及流域水资源管理提供科学依据。

1 研究区、数据与方法

1.1 研究区概况

从大西海子水库至台特玛湖的这段河道为塔里木河下游,长约428 km,蜿蜒在库鲁克与塔克拉玛干两大沙漠之间;该区属大陆性暖温带干旱气候,多年平均降水量17.4~42.0 mm;多年平均太阳辐射5692~6360 MJ·m^{-2};多年平均日照时数2780~2980 h;多年平均潜在蒸发量2500~3000 mm;多年平均日较差13~17 ℃;多年平均≥10 ℃积温4040~4300 ℃[1-2]。塔里木河下游自身不产流,沿河漫滩及河道两岸发育着依赖于地表径流和地下水存活的、以胡杨为优势建群种的荒漠河岸林,河道断流后,胡杨生长主要依赖地下水。生态输水工程实施以来,河道输水成为地下水补给的主要来源。

1.2 数据获取与分析

于2015年9月在塔里木河下游2000年始布设的地下水监测井周围(下游上段英苏断面),采用生长锥采集胡杨树芯样品,采集高度为离胡杨树干基部1~1.5 m,且每棵树南北向各取1个样芯。考虑到胡杨存在空心现象,木质部容易腐烂,若树木胸径超过50 cm但因木质部腐烂获取到的样芯≤5 cm的视为无效取样[1-2]。根据此采样原则,共获得58个有效样芯。将采集的样芯干燥、固定、打磨,采用LintabTM 6树木年轮分析仪(精度为0.001 mm)测量树木年轮宽度并进行交叉定年。经Cofecha交叉定年质量控制程序确保定年的准确性,剔除相关性差、序列过短或奇异点过多的个别序列。轮宽指数构建由Arstan软件完成,生长趋势去除采用负指数函数和样条函数完成,年表可靠性由信噪比(SSS)大于0.85确定。

考虑到树木年轮宽度可能受到多种因素影响,为避免采用单一的轮宽指标分析树木生长特征导致偏差,我们还测定了受树龄生长效应和人为主观性影响较小的树轮稳定碳同位素比率($\delta^{13}C$)。它也是反映树木生长特征的指标,可以很好地表征树木生长过程中的内在水分利用效率(Intrinsic water use efficiency, iWUE)。选取已测量完轮宽且交叉定年的树芯,在显微镜下用不锈钢刀片逐轮剥离样品,剥离过程中避免碳污染。将剥离下来的相同年份的样品合并为一个样,然后置于60 ℃下干燥24 h、粉碎、过60目筛。采用安瓶有机碳燃烧法制备CO_2。处理后的样品用MAT-251质谱仪测逐轮的$^{13}C/^{12}C$比值,以$\delta^{13}C$表示。树轮$\delta^{13}C$计算公式为:

$$\delta^{13}C=\left[\frac{\delta^{13}C_{sample}}{\delta^{13}C_{standard}}-1\right]\times 1000 \qquad (1)$$

式中:$\delta^{13}C$表示树轮稳定碳同位素比率(‰);$\delta^{13}C_{sample}$表示树轮样品中的^{13}C含量;$\delta^{13}C_{standard}$表示标准样品中的^{13}C含量。

2000—2015年每年的生态输水时间、输水量、持续时间等数据来自于塔里木河流域管理局,地下水埋深数据来自于下游自2000年始沿河岸布设的地下水监测井实测数据。数据统计分析采用SPSS 13.0,制图采用Sigmaplot 12.5。

2 结果与分析

2.1 胡杨树木生长特征

塔里木河下游取样区内胡杨胸围平均值在203.43 cm,胸围超过250.00 cm的胡杨仅占20%左右,胸围为157.00~250.00 cm的胡杨约占52.70%(图1a)。树龄分布频率统计显示,塔里木河下游胡杨树龄主要集中在50~80 a(图1b)。

对比分析生态输水实施后的16 a间(2000—2015)胡杨轮宽指数和树轮$\delta^{13}C$变化发现(图2),塔里木河下游胡杨平均轮宽指数为1.16,平均树轮$\delta^{13}C$为−27.20‰。Pearson相关性分析表明,树轮$\delta^{13}C$与轮宽指数呈显著正相关相关(r=0.549, P<0.05),且树轮$\delta^{13}C$与滞后1 a的轮宽指数呈极显著正相关(r=0.734, P<0.01)。这表明,树轮$\delta^{13}C$与树木生长密切相关,且树轮$\delta^{13}C$与树木生长的关系具有滞后性。

2.2 生态输水对胡杨生长的影响

自2000年始,塔里木河流域管理局实施了从开都河-孔雀河和塔里木河干流调水到塔里木河下游的生态输水工程,用以抬升地下水埋深、重建和恢复沿河两岸植被。2000—2015年共实施了22次生态输水(表1),除2008年外,每年均有生态水下泄至塔里木河下游,16 a间合计向下游输送生态水量为54.56×10^8 m^3,单次输水量最大为8.23×10^8 m^3,单次

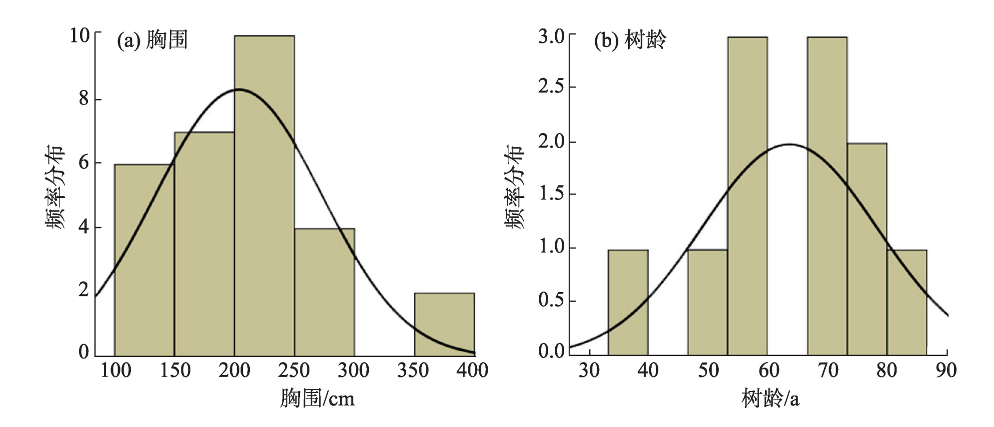


图1　塔里木河下游英苏断面胡杨胸围和树龄分布图

Fig. 1　Frequencies of circumference at breast height and tree ages of *Populus euphratica* in the Yingsu section in the lower reaches of Tarim River

表1　2000—2015年塔里木河下游生态输水统计

Tab. 1　Ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River from 2000 to 2015

输水年份	输水时间（年/月/日）	历时时间/d	大西海子下泄水量/10^8 m^3	水量来源/10^8 m^3		年输水量/10^8 m^3	水头到达位置
				开都河–孔雀河	塔里木河干流		
2000	2000/5/14—2000/7/12	60	0.98	0.99	0	3.26	喀尔达依
	2000/11/3—2001/2/5	95	2.26	2.27	0		阿拉干
2001	2001/4/1—2001/7/6	97	1.84	1.84	0	3.82	考干
	2001/8/8—2001/11/8	93	1.98	1.63	0.35		台特玛湖
2002	2002/6/7—2002/11/10	157	3.31	2.45	0.86	3.31	台特玛湖
2003	2003/3/2—2003/7/8	129	3.40	2.40	1.00	6.25	台特玛湖
	2003/8/4—2003/11/3	92	2.85	0	2.85		台特玛湖
2004	2004/4/23—2004/6/22	61	1.02	0.74	0.29	1.02	台特玛湖
2005	2005/5/7—2005/6/7	32	0.52	0.52	0	2.82	台特玛湖
	2005/8/30—2005/10/31	63	2.30	0	2.30		台特玛湖
2006	2006/9/25—2006/11/21	58	2.01	0.27	1.74	2.01	考干
2007	2007/9/15—2007/10/21	37	0.14	0.14	0	0.14	喀尔达依
2008	–	–	–	–	–	–	–
2009	2009/11/25—2009/12/31	37	0.11	0.11	0	0.11	喀尔达依
2010	2010/6/20—2010/7/15	26	0.30	0	0.30	3.90	喀尔达依
	2010/7/30—2010/11/15	117	3.60	0	3.60		台特玛湖
2011	2011/1/7—2011/1/25	19	0.36	0	0.36	8.23	台特玛湖
	2011/4/17—2011/11/23	221	7.87	0	7.87		台特玛湖
2012	2012/4/27—2012/6/12	47	6.70	0	6.70	6.70	台特玛湖
2013	2013/4/25—2013/5/30	36	0.14	0	0.14	4.88	依干不及麻
	2013/8/6—2013/11/5	92	4.74	3.47	1.28		台特玛湖
2014	2014/6/17—2014/8/25	70	3.50	0	3.50	3.50	台特玛湖
2015	2015/8/18—2015/11/5	79	4.61	0	4.61	4.61	台特玛湖
合计						54.56	

注:2008年没有实施生态输水。

输水量最小为0.11×10^8 m^3,有14次生态输水的水头到达了台特玛湖(表1)。

2.2.1　生态输水量与胡杨生长关系　考虑到环境因素对树木生长的影响具有一定的滞后效应,且不同时间段内的环境变化对树木生长的作用大小也不一致,根据塔里木河下游胡杨的普遍生长时期,本文分别统计了2000—2015年自然年(当年1—12月)、生长年(前一年9月—当年8月)、生长季(当年

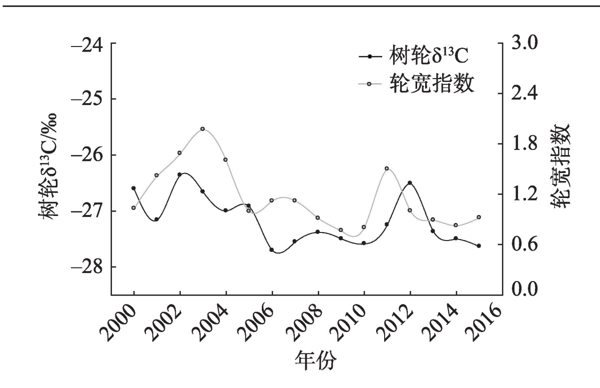


图2 2000—2015年塔里木河下游胡杨轮宽指数和树轮δ13C变化

Fig. 2 Tree-ring width chronology and δ13C of tree-ring of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River from 2000 to 2015

4—8月)和前一生长年(前一年4月—当年3月)的生态输水量。在2000—2015年生态输水影响下,塔里木河下游胡杨生长过程经历了3个阶段(图3):2000—2003年持续生态输水对胡杨生长起到极大的促进作用,胡杨轮宽指数和树轮δ13C呈增加趋势,其平均值分别为1.52和-26.70‰;2004—2009年输水量逐渐减少甚至停止后,胡杨轮宽指数和树轮δ13C也呈降低趋势,其平均值分别降低28.83%和2.41%;2010年下游重新输入大量生态水后,轮宽指数和树轮δ13C又逐渐增加,在之后几年内每年的大量生态输水下,轮宽指数和树轮δ13C趋于稳定。Pearson相关性分析表明,除自然年生态输水量外,生长年、生

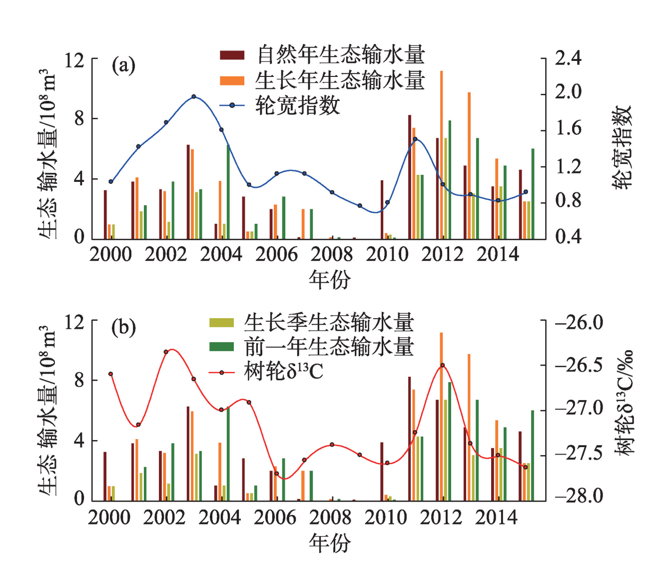


图3 生态输水量与胡杨轮宽指数、树轮δ13C的关系

Fig. 3 Relationships between ecological water conveyance amount to tree-ring width chronology and δ13C of tree-ring of *Populus euphratica*

长季、前一生长年生态输水量均与胡杨轮宽指数呈极显著正相关,相关性指数分别为0.950(P<0.01)、0.832(P<0.01)和0.804(P<0.01);同时,生长季生态输水量与胡杨树轮δ13C也呈显著正相关(r=0.655,P<0.05)。

2.2.2 生态输水持续时间与胡杨生长关系 因受上中游来水量和用水量的限制,塔里木河下游生态输水时间每年都不固定。2000—2015年生态输水持续时间统计显示(图4),2006—2009年的生长季均无生态水输入;2009年整个生长年和前一生长年生态输水时间也均为0。Pearson相关性分析表明,自然年生态输水持续时间与胡杨轮宽指数呈显著正相关(r=0.610,P<0.05),生长年、生长季和前一生长年生态输水持续时间与胡杨轮宽指数呈极显著正相关(r=0.749,0.668,0.712,P<0.01)。尽管自然年中是2008年无生态输水而2009年有输水,但因2009年生长季、生长年和前一生长年均没有生态水补给,且2006—2009年连续4 a生长季都无生态水补给,这导致了胡杨轮宽指数和树轮δ13C在2009年降至生态输水工程实施以来16 a间的最低值,分别为0.76和-27.50‰,较2003年分别降低了61.18%和3.14%。因此,生态输水持续时间对胡杨生长发育也具有重要作用,若要有效恢复与重建胡杨林,最好在植物生长季下泄生态水。

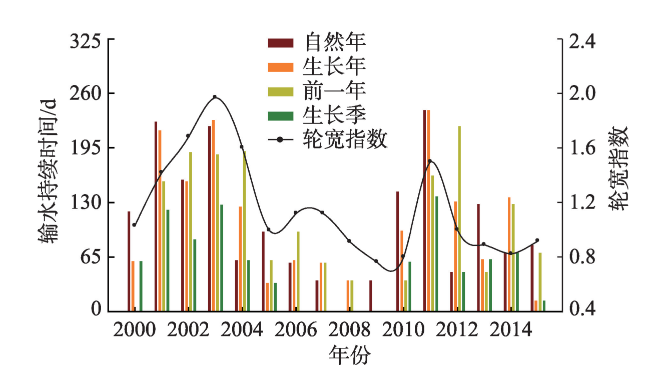


图4 生态输水持续时间与胡杨轮宽指数关系

Fig. 4 Relationship between ecological water conveyance period and tree-ring width chronology of *Populus euphratica*

2.3 地下水埋深变化对胡杨生长的影响

河道持续断流导致下游沿河两岸地下水埋深不断增加,2000年时平均地下水埋深近8 m。生态输水实施后,地下水埋深逐渐减小(图5),表明生态输水工程的实施有效地改善了下游水环境。Pearson相关性分析显示(表2),地下水埋深与当年生态

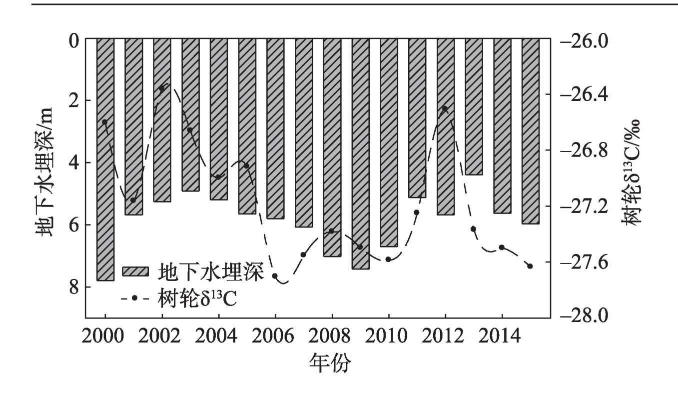


图5 地下水埋深与胡杨树轮δ13C变化

Fig. 5 Relationship between groundwater depth and δ13C of tree-ring of *Populus euphratica*

输水量之间不存在显著关系，而与前一年生态输水量呈极显著负相关。这表明从生态输水实施到地下水埋深减小之间存在近1 a的滞后。

地下水埋深与当年胡杨轮宽指数和滞后1 a的树轮δ13C均呈显著负相关（表2）。同时，胡杨树木年轮宽度与地下水埋深散点图显示，塔里木河下游成年胡杨主要生活在地下水埋深4~8 m范围内，且4~6 m地下水埋深下胡杨径向生长相对较快（图6），表明适宜胡杨长期生长的地下水埋深范围是4~8 m，且4~6 m地下水埋深下胡杨的生长速率比在6~8 m地下水埋深下更快。

表2 地下水埋深与生态输水量和胡杨生长特征的相关性

Tab. 2 Pearson correlations between groundwater depth and ecological water conveyance, growth characteristics of *Populus euphratica*

Pearson相关分析	自然年生态输水量	生长年生态输水量	生长季生态输水量	前一生长年生态输水量	树轮δ13C	滞后1 a树轮δ13C	轮宽指数	滞后1 a轮宽指数
自然年地下水埋深	−0.414	−0.470	−0.378	−0.799**	−0.12	−0.619*	−0.536*	−0.372
滞后1 a地下水埋深	−0.743**	−0.603*	−0.629*	−0.507	–	–	–	–

注：*表示0.05的显著水平，**表示0.01的显著水平。

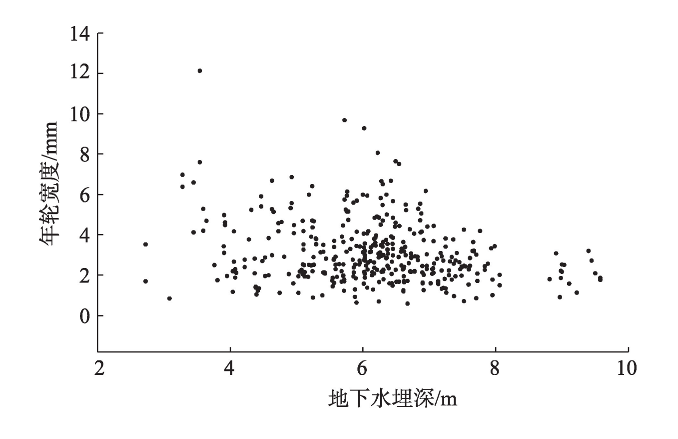


图6 地下水埋深与胡杨树木年轮宽度关系

Fig. 6 Relationship between groundwater depth and tree-ring width of *Populus euphratica*

3 讨 论

关于塔里木河下游生态输水对荒漠河岸林的影响研究，大多都基于植被样地的实地调查[3-5,11-12]，或3S技术[6,9,13]和生态水文模型模拟[14]。由于数据源的时间跨度长短各异、调查区域范围不同等原因，研究结果往往有差异。这是因为生态输水对植被的影响是一个长期而缓慢的过程，短时期的分析结果可能并不能揭示其长期的变化规律。因此，如何寻找一个有效地、可以表征长时间序列的生理生态指标来评估长期生态输水对植物生长的影响则成为了评价生态输水工程效应的重要环节。大量研究证实，树木年轮技术是研究水文过程的重要技术手段[1-2,10,15-19]。然而，树木生长容易受到众多环境因子的共同影响，树轮宽度记录的环境信息相对复杂，且较易受到树木自身生长趋势影响，而树轮碳同位素分馏机制更清晰，不容易受树龄效应、树木自身生理因素和人为主观的影响[20]，是研究树木长期生长特征的一个更为成熟的有效指标。

本文采用树木轮宽和稳定碳同位素双指标，综合分析塔里木河下游胡杨的生长特征，以弥补单个代用指标不能指代清楚的缺陷。研究结果显示，由于生态输水的影响，塔里木河下游胡杨轮宽指数和树轮δ13C均在2000年后发生了显著变化，尤其是在输水工程实施的前4 a（2000—2003年），胡杨生长对生态输水的响应十分敏感，表明生态输水工程的持续实施对胡杨的长期生长起到了明显的促进作用，这与输水期间经野外植被调查和遥感解译分析的结论相吻合[1-12]。树轮的双指标分析显示，塔里木河下游荒漠河岸林胡杨轮宽指数与树轮δ13C呈显著

正相关，这表明轮宽指数和δ13C变化趋势一致，均可以作为解释胡杨生长特征的有效代用指标。相较于轮宽指数，胡杨树轮δ13C受生长趋势的影响更小，稳定性更强[20]。因此，胡杨树轮δ13C可能更适宜作为研究生态输水与胡杨生长关系的生态指标。

树轮δ13C，作为植物碳吸收同化和水分蒸散的比率，是追踪树木生长过程中植物内在水分利用效率(iWUE)长期变化的有效工具，且与iWUE呈正相关[21-23]。塔里木河下游胡杨树轮δ13C与生态输水量呈显著正相关，且与地下水埋深呈显著负相关，这表明胡杨水分利用效率随生态输水的增加或者地下水埋深的降低而升高。iWUE是光合速率与气孔导度之比，其值的提高在一定程度上表征着光合作用增强。因此，生态输水可能是通过提升胡杨的水分利用效率，增加光合累积产物，从而促进了树木的生长发育。

胡杨轮宽指数与自然年(1—12月)生态输水量无显著相关性，但与生长年和生长季生态输水量呈极显著正相关，且胡杨树轮δ13C仅与生长季生态输水量呈显著正相关，这表明胡杨生长除受生态输水量影响外，还与输水时间密切相关。生态输水、地下水埋深与胡杨轮宽指数及树轮δ13C相关性分析发现，生态输水和地下水埋深对改善胡杨水分利用效率和生物量累积之间具有1 a左右的滞后效应，且胡杨生长对其生长年和生长季内生态输水最为敏感。因此，为维持荒漠河岸林的有效恢复与重建，塔里木河下游生态输水时间需要配合植物生长周期。

4 结 论

极端干旱区，水资源是限制植物生长发育的决定性因素。关于塔里木河下游植物与地表径流和地下水关系的研究不胜枚数，但大多研究都是基于植物个体的瞬时生理生化特征或野外植被多样性变化调查，抑或是遥感解译的归一化植被指数(NDVI)变化等进行的。目前，对于植物长期生长特征与水资源关系的研究尚显薄弱。本研究基于2000—2015年胡杨轮宽指数、树轮δ13C、生态输水及地下水埋深数据，分析了塔里木河下游2000年以来的地表径流、地下水以及生态输水时间对胡杨长期生长的影响。本研究结果表明生态输水形成的地表径流显著改变了地下水埋深，促进了胡杨的生长；生态输水量与胡杨轮宽指数和树轮δ13C显著正相关，2004—2009年生态输水量的减少使得胡杨轮宽指数和树轮δ13C分别减少了28.83%和2.41%；生态输水时间与树木生长密切相关，生长季进行生态输水对胡杨生长最有利；生态输水后胡杨可通过提升水分利用效率、增加光合累积产物来促进生长。本研究结果对诠释塔里木河下游胡杨长期生长过程与水资源关系提供了重要的理论基础。

参考文献(References)

[1] 周洪华, 李卫红, 孙慧兰. 基于胡杨年轮的塔里木河下游地下水埋深历史重建[J]. 林业科学, 2018, 54(4): 11-16. [Zhou Honghua, Li Weihong, Sun Huilan. Reconstruction of groundwater depth using tree-ring of *Populus euphratica* in the lower Tarim River[J]. Scientica Silvae Sinicae, 2018, 54(4): 11-16.]

[2] 周洪华, 李卫红, 李玉朋, 等. 基于树木年轮技术的塔里木河下游河岸胡杨林生态需水量研究[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7576-7584. [Zhou Honghua, Li Weihong, Li Yupeng, et al. Estimation of ecological water demand of a desert riparian forest using tree rings of *Populus euphratica* in the lower Tarim River[J]. Acta Ecologic Sinica, 2017, 37(22): 7576-7584.]

[3] Chen Y, Zhang X, Zhu X, et al. Analysis on the ecological benefits of the stream water conveyance to the dried-up river of the lower reaches of Tarim River, China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2004, 47(11): 1053-1064.

[4] 朱成刚, 艾克热木·阿布拉, 李卫红, 等. 塔里木河下游生态输水条件下胡杨林生态系统恢复研究[J/OL]. 干旱区地理. [2021-03-29]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20210328.1831.008.html. [Zhu Chenggang, Aikeremu Abula, Li Weihong, et al. Ecosystem restoration of *Populus euphratica* forest under the ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River[J/OL]. Arid Land Geography. [2021-03-29]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20210328.1831.008.html.]

[5] 史浩伯, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游植被种间关系与稳定性分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 220-226. [Shi Haobo, Chen Yaning, Li Weihong. Interspecific association and stability of vegetation in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 220-226.]

[6] 古力米热·哈那提, 王光焰, 张音, 等. 干旱区间歇性生态输水对地下水位与植被的影响机理研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 726-733. [Hanati Gulimire, Wang Guangyan, Zhang Yin, et al. Influence mechanism of intermittent ecological water conveyance on groundwater level and vegetation in arid land[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 726-733.]

[7] 李丽君, 张小倩, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqian, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twen-

ty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238−247.]

[8] Hao X M, Chen Y N, Li W H. Indicating appropriate groundwater tables for desert river-bank forest at the Tarim River, Xinjiang, China[J]. Environmental Monitoring Assessment. 2009, 152(1−4): 167−177.

[9] 李均力, 肖昊, 沈占峰, 等. 2013—2018年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985−992. [Li Junli, Xiao Hao, Shen Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013—2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985−992.]

[10] Yu P, Xu H, Liu S, et al. Effects of ecological water conveyance on the ring increments of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Forest Research, 2012, 17(5): 413−420.

[11] Yan H, Wang Y, Wang Y. The influence of 10 years of water conveyances on groundwater and juvenile *Populus euphratica* of the lower Tarim River[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71: 4091−4096.

[12] Hao X, Li W. Impacts of ecological water conveyance on groundwater dynamics and vegetation recovery in the lower reaches of the Tarim River in northwest China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186: 7605−7616.

[13] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 415−424. [Sun Tianyao, Li Xuemei, Xu Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 415−424.]

[14] Han M, Zhao C, Feng G, et al. An eco-hydrological approach to predicting regional vegetation and groundwater response to ecological water conveyance in dryland riparian ecosystems[J]. Quaternary International, 2015, 380−381: 224−236.

[15] Deng X, Xu H, Ye M, et al. Impact of long-term zero-flow and ecological water conveyance on the radial increment of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China [J]. Regional Environmental Change, 2015, 15: 13−23.

[16] Zhang Z. Tree-rings, a key ecological indicator of environment and climate change[J]. Ecological Indicators, 2015, 51: 107−116.

[17] St. George S. An overview of tree-ring width records across the northern Hemisphere[J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 95: 132−150.

[18] Zhou H H, Chen Y N, Hao X M, et al. Tree rings: A key ecological indicator for reconstruction of groundwater depth in the lower Tarim River, northwest China[J]. Ecohydrology, 2019, 12(8): 1250−1380.

[19] Schilling O S, Doherty J, Kinzelbach W, et al. Using tree ring data as a proxy for transpiration to reduce predictive uncertainty of a model simulating groundwater-surface water-vegetation interactions [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(B): 2258−2271.

[20] Friedman M J, Stricker A C, Csank Z A, et al. Effects of age and environment on stable carbon isotope ratios in tree rings of riparian *Populus*[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 524: 25−32.

[21] 路伟伟. 基于树轮碳稳定同位素的林木长期水碳耦合机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. [Lu Weiwei. Long-term water-carbon coupling mechanism of trees based on tree-ring stable carbon isotopes[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.]

[22] 管文轲. 不同生境胡杨叶片δ^{13}C和δ^{15}N及其对环境因子的响应[J]. 西北植物学报 2020, 40(6): 1031−1042. [Guan Wenke. Response of leaf δ^{13}C and δ^{15}N and environmental factors in different habitats of *Populus euphratica*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(6): 1031−1042.]

[23] 黄甫昭, 李冬兴, 王斌, 等. 喀斯特季节性雨林植物叶片碳同位素组成及水分利用效率[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1833−1839. [Huang Puzhao, Li Dongxing, Wang Bin, et al. Foliar stable carbon isotope composition and water use efficiency of plant in the Karst seasonal rain forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(6): 1833−1839.]

Effects of ecological water conveyance on the growth characteristics of *Populus euphtatica* in the lower reaches of Tarim River based on tree-rings

ZHOU Honghua, CHEN Yapeng, YANG Yuhai, ZHU Chenggang

(State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Water is a decisive factor limiting plant growth and development in extremely arid areas. Although numerous studies on the relationship between water resources and plants in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China have been published, most of them focused on short time changes in the physiological or biochemical characteristics of individual plants, plant diversity, or normalized differential vegetation index. Thus, the relationship between long-term plant growth characteristics and water resources must be examined further. In this study, the responses of the long-term growth characteristics of *Populus euphratica* to ecological water conveyance from 2000 to 2015 in the lower reaches of Tarim River were analyzed using the tree-ring width chronology and stable carbon isotope ($\delta^{13}C$) characteristics of the species. Results showed that: (1) *P. euphratica* growth was significantly related to the amount of ecological water conveyance, and the tree-ring width chronology and $\delta^{13}C$ values of *P. euphratica* in Yingsu indicated three stages. Specifically, tree growth was very sensitive to ecological water conveyance in 2000—2003, and the main tree-ring width chronology and $\delta^{13}C$ values of *P. euphratica* in this period were 1.52 and −26.70‰, respectively. When ecological water conveyance was reduced in 2004—2009, the mean tree-ring width chronology and $\delta^{13}C$ values of the species decreased by 28.83% and 2.41%, respectively. The values of these indices remained stable when the ecological water conveyance amount was increased and maintained in 2010—2015. (2) *P. euphratica* growth was closely related to the ecological water conveyance time, especially in terms of growth year (from previous September to current August), growth season (from April to August), and previous growth year (from previous April to current March). However, plant growth was not significantly related to ecological water conveyance of the calendar year (from January to December). Because no ecological water conveyance was conducted in the growth season, growth year, and previous growth year of 2009 or in the growth seasons of 2006—2009, the tree-ring width chronology and $\delta^{13}C$ values of *P. euphratica* of 2009 were lowest in 2000—2015. The tree-ring-width chronology and $\delta^{13}C$ values of *P. euphratica* in 2009 decreased by 61.18% and 3.14% compared with those in 2003, respectively. (3) Ecological water conveyance decreased the groundwater depth and improved the water environment of *P. euphratica*, thereby enhancing the water use efficiency, accumulated photosynthetic production, and growth of the trees. However, a 1-year lag effect between ecological water conveyance, groundwater depth, and *P. euphratica* growth was also observed. Therefore, ecological water conveyance should be implemented during the plant growth period in the lower reaches of Tarim River to restore and reconstruct the desert riparian forest effectively.

Key words: ecological water conveyance; tree-ring width chronology; stable carbon isotope; groundwater depth; *Populus euphtatica*